

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Patentschrift  
⑪ DE 3326736 C2

⑤1 Int. Cl. 4:  
G01 R 33/032

②1 Aktenzeichen: P 33 26 736.7-35  
②2 Anmeldetag: 25. 7. 83  
④3 Offenlegungstag: 9. 2. 84  
④5 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 2. 10. 86

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1  
27.07.82 JP P129524-82

⑦3 Patentinhaber:  
Tokyo Shibaura Denki K.K., Kawasaki, Kanagawa, JP

⑦4 Vertreter:  
Behn, K., Dipl.-Ing.; Münzhuber, R., Dipl.-Phys.,  
Pat.-Anw., 8000 München

⑦2 Erfinder:  
Matsumoto, Mitsuo, Kokubunji, Tokio/Tokyo, JP

⑤6 Im Prüfungsverfahren entgegengehaltene  
Druckschriften nach § 44 PatG:

DE-OS 31 41 325  
DE-OS 30 19 030  
DE-OS 27 58 611  
DE-OS 19 18 730

Applied Optics, Vol. 19, No. 22, Nov. 1980, S. 3729-3734;

⑤4 Magnetfeld-Meßvorrichtung

DE 3326736 C2

DE 3326736 C2

FIG. 1

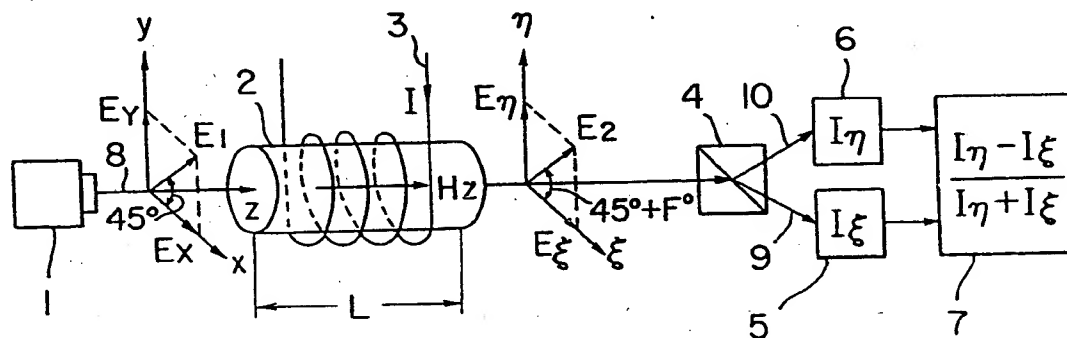


FIG. 2

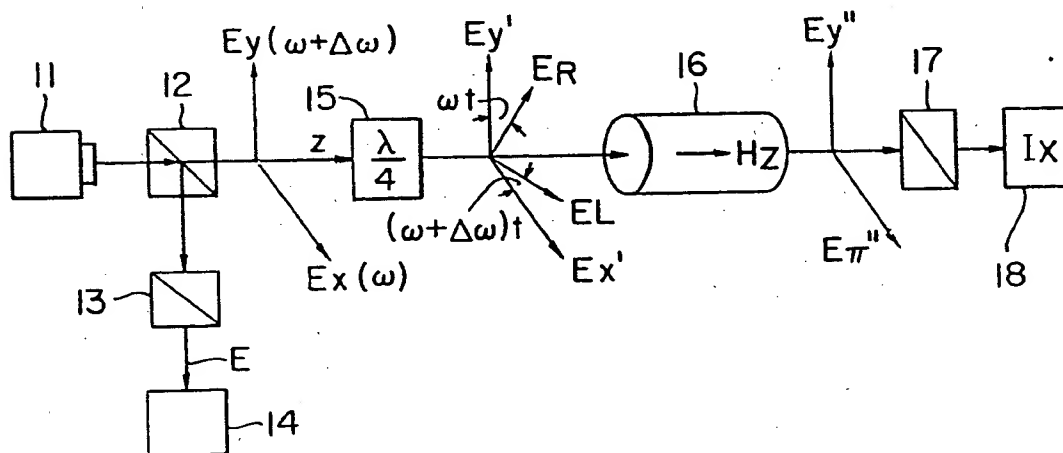


FIG. 3

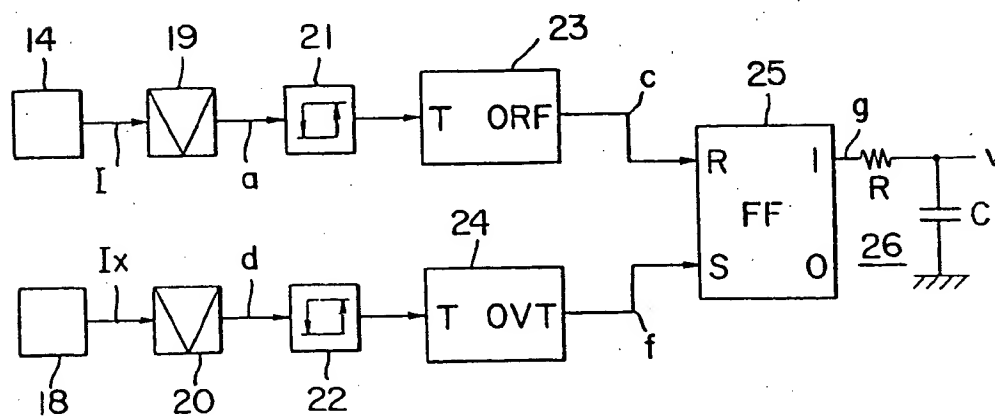


FIG. 4

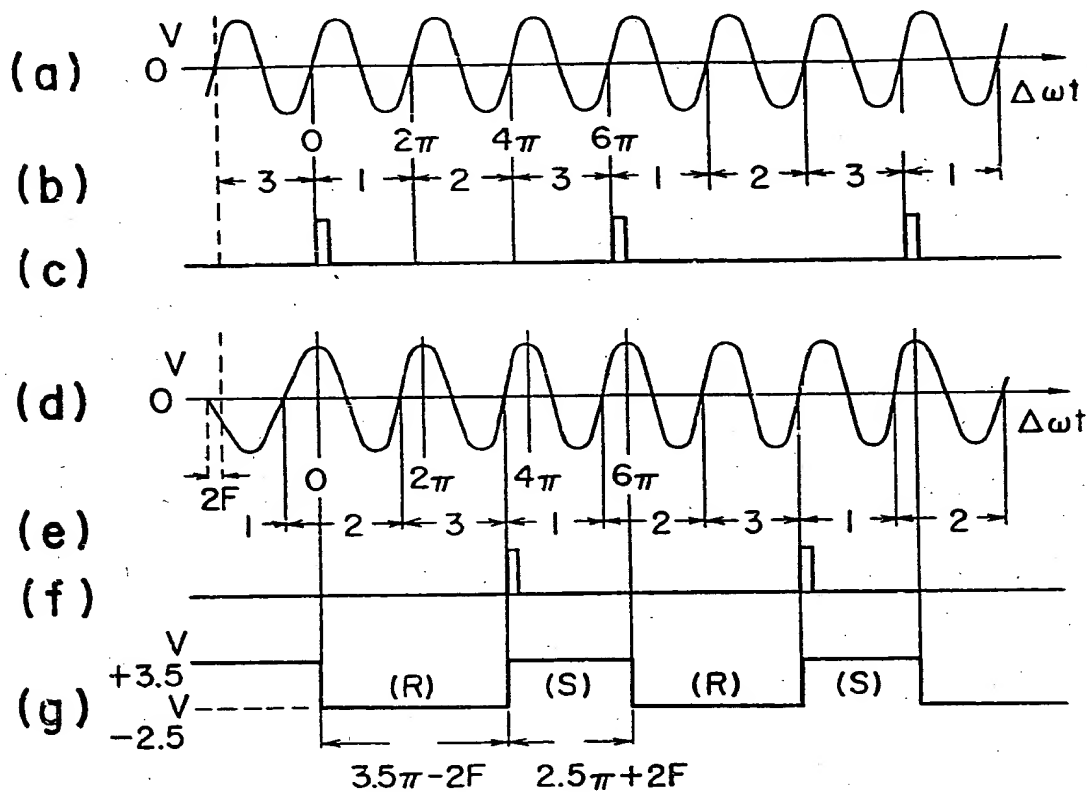
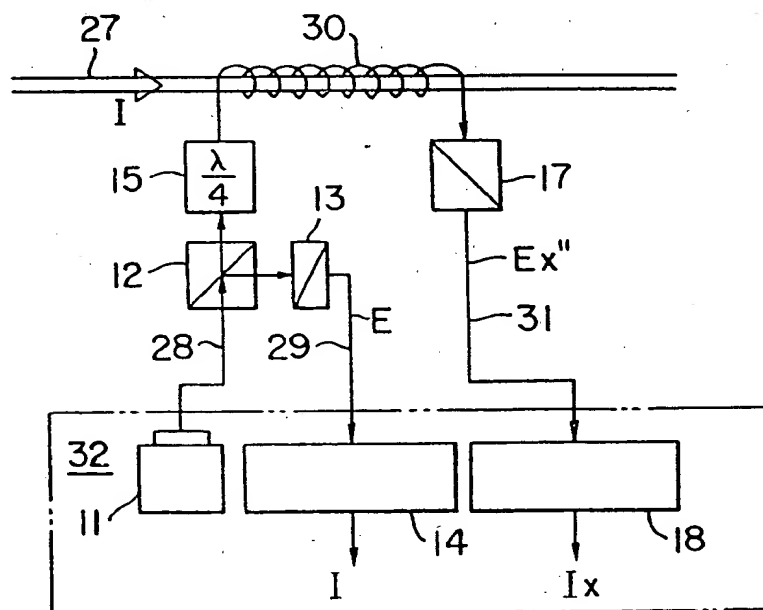


FIG. 5





## Patentanspruch:

Magnetfeld-Meßvorrichtung, bei welcher ein von einer Laserlichtquelle geliefertes Laserlicht einen Faraday-Rotator durchsetzt, auf den ein zu messendes Magnetfeld einwirkt, wobei das vom Faraday-Rotator gelieferte Ausgangssignal in einem ersten optischen Analysator analysiert ist, wobei die Laserlichtquelle Laserlicht mit einer ersten Komponente mit einer ersten Frequenz und einer zweiten Komponente mit einer zweiten Frequenz erzeugt, die in zueinander senkrechten Richtungen polarisiert sind, wobei eine Strahl-Aufspaltvorrichtung vorgesehen ist, welche das von der Laserlichtquelle gelieferte Laserlicht in einen ersten Laserlichtanteil und einen zweiten Laserlichtanteil mit gleichen optischen Eigenschaften aufteilt, wobei ein zweiter optischer Analysator vorgesehen ist, welcher aus dem von der Strahl-Aufspaltvorrichtung gelieferten ersten Laserlichtanteil eine vorbestimmte Komponente ausblendet, wobei ein Viertelwellenlängenplättchen vorgesehen ist, welches den von der Strahl-Aufspaltvorrichtung gelieferten zweiten Laserlichtanteil aufnimmt und in den Faraday-Rotator ein kreisförmig polarisiertes Laserlicht liefert, wobei der erste optische Analysator aus dem vom Faraday-Rotator gelieferten Laserlicht eine vorgegebene Polarisationskomponente ausblendet, wobei ein erster photoelektrischer Wandler und ein zweiter photoelektrischer Wandler vorgesehen sind, welche die Lichtausgangssignale des ersten optischen Analysators bzw. des zweiten optischen Analysators in ein erstes bzw. ein zweites elektrisches Signal umwandeln und das erste und zweite elektrische Signal in einer Phasenvergleichsschaltung ausgewertet sind, dadurch gekennzeichnet, daß in der Phasenvergleichsschaltung ein erstes Filter (19) und ein zweites Filter (20) vorgesehen sind, welche aus den von den photoelektrischen Wandlern (14, 18) gelieferten ersten bzw. zweiten elektrischen Signalen Gleichstromkomponenten entfernen, daß Nulldurchgangsdetektoren (21, 22) vorgesehen sind, welche in den von den Filtern (19, 20) kommenden Ausgangssignalen Nulldurchgänge feststellen, daß durch die Ausgangssignale der Nulldurchgangsdetektoren (21, 22) getriggerte Dreistufenzähler (23, 24) vorgesehen sind, daß eine Flip-Flop-Schaltung (25) vorgesehen ist, welche durch die Ausgangssignale von den Dreistufenzählern (23, 24) zurückgestellt und eingestellt sind, und daß ein R-C-Tiefpaßfilter vorgesehen ist, welches das Ausgangssignal der Flip-Flop-Schaltung (25) aufnimmt und eine dem Faraday-Rotationswinkel direkt proportionale Ausgangsspannung liefert.

Die Erfindung betrifft eine Magnetfeld-Meßvorrichtung, bei welcher ein von einer Laserlichtquelle geliefertes Laserlicht einen Faraday-Rotator durchsetzt, auf den ein zu messendes Magnetfeld einwirkt, wobei das vom Faraday-Rotator gelieferte Ausgangssignal in einem ersten optischen Analysator analysiert ist, wobei die Laserlichtquelle Laserlicht mit einer ersten Komponente mit einer ersten Frequenz und einer zweiten Komponente mit einer zweiten Frequenz erzeugt, die in zueinander senkrechten Richtungen polarisiert sind, wobei eine Strahl-Aufspaltvorrichtung vorgesehen ist, welche das von der Laserlichtquelle gelieferte Laserlicht in einen ersten Laserlichtanteil und einen zweiten Laserlichtanteil mit gleichen optischen Eigenschaften aufteilt, wobei ein zweiter optischer Analysator vorgesehen ist, welcher aus dem von der Strahl-Aufspaltvorrichtung gelieferten ersten Laserlichtanteil eine vorbestimmte Komponente ausblendet, wobei ein Viertelwellenlängenplättchen vorgesehen ist, welches den von der Strahl-Aufspaltvorrichtung gelieferten zweiten Laserlichtanteil aufnimmt und in den Faraday-Rotator ein kreisförmig polarisiertes Laserlicht liefert, wobei der erste optische Analysator aus dem vom Faraday-Rotator gelieferten Laserlicht eine vorgegebene Polarisationskomponente ausblendet, wobei ein erster photoelektrischer Wandler und ein zweiter photoelektrischer Wandler vorgesehen sind, welche die Lichtausgangssignale des ersten optischen Analysators bzw. des zweiten optischen Analysators in ein erstes bzw. ein zweites elektrisches Signal umwandeln und das erste und zweite elektrische Signal in einer Phasenvergleichsschaltung ausgewertet sind.

Eine Magnetfeld-Meßvorrichtung der vorgenannten Art (DE-OS 31 41 325 gemäß § 3, Abs. 2, Nr. 1 PatG) ist leicht von einer elektrischen Leitung, z. B. einer Hochspannungsleitung, zu isolieren, und sie wird durch ein Magnetfeld nicht gestört. Das Meßergebnis wird aber durch den Verlust in den optischen Wegen beeinflußt, und es ist das Meßergebnis nicht dem Drehwinkel der Polarisationssebene proportional. Bei Verwendung eines photoelektrischen Wandlers, wie einer Fotodiode, zur Umwandlung der Meßergebnisse in elektrische Signale werden diese durch eine durch Temperaturänderungen oder dergleichen bewirkte Drift in der Charakteristik des Wandlers geändert.

Diese Schwierigkeiten der die Faraday-Wirkung verwendenden bekannten Vorrichtung werden in Verbindung mit Fig. 1 näher erläutert.

In Fig. 1 liefert eine Laser-Lichtquelle 1 einen Laser-Lichtstrahl 8, der eine elektromagnetische Welle mit einer elektrischen Feldkomponente  $E_1$  besitzt und die in einer Ebene (oder einer Polarisationssebene) mit einer Frequenz  $\omega$  schwingt. Das so durch die elektrische Feldkomponente  $E_1$  dargestellte Laser-Licht wird einem Faraday-Rotator 2 zugeführt.

Ein orthogonales Koordinatensystem mit X-, Y- und Z-Achsen wird an der Eingangsseite des Faraday-Rotators 2 angenommen, wobei sich die Z-Achse entlang der Mittellinie des Rotators 2 erstreckt. Ferner werden orthogonale Koordinaten  $\xi$  und  $\eta$  an der Ausgangsseite des Faraday-Rotators 2 angenommen, die sich rechtwinklig zu der sich entlang der Mittellinie des Rotators 2 erstreckenden Z-Achse erstrecken.

Die elektrische Feldkomponente  $E_1$  des Laser-Lichtstrahles 8, die von der Laser-Lichtquelle geliefert wird, wobei die Polarisationssebene des Lichtstrahles unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur X-Achse angeordnet ist, durchsetzt dann den Faraday-Rotator 2 in Richtung Z-Achse, und er wird dann einem Wollastonprisma 4 zugeführt. Das Wollastonprisma 4 spaltet das linear polarisierte Licht in zwei Komponenten 9 und 10 auf.

Ein elektrischer Leiter 3 ist um den Faraday-Rotator 2 gewunden, wie es in Fig. 1 gezeigt ist. Ein durch den Leiter 3 fließender elektrischer Strom  $E$  induziert in Richtung Z-Achse ein magnetisches Feld  $H_z$ , das dem Strom  $I$  proportional ist. Das magnetische Feld  $H_z$  dreht die Polarisationssebene des den Faraday-Rotator 2 durchsetzenden Laser-Lichtes um einen Winkel  $F^\circ$  aus seiner Originalposition, die einen Winkel von  $45^\circ$  zur X-Achse bildet. Das heißt, der Licht Ausgang  $E_2$ , der von dem Faraday-Rotator 2 geliefert wird, ist ein linear polarisiertes Licht mit einer Polarisationssebene, die um einen Winkel von  $45^\circ + F^\circ$  von der X-Achse aus gedreht ist.

Der Winkel  $F$ , der durch den Rotator 2 gedreht worden ist, wird durch die folgende Gleichung definiert:

$$F = V_k \cdot H_z \cdot L$$

wobei  $V_k$  die Verdet'sche Konstante der den Faraday-Rotator bildenden magnetooptischen Substanz ist und wobei  $L$  die Länge des Faraday-Rotators entlang der Z-Achse darstellt. Unter Verwendung dieser Beziehung kann das Magnetfeld  $H_z$  und somit der dem Magnetfeld  $H_z$  proportionale Strom  $I$  durch Feststellung des gedrehten Winkel  $F$  der Polarisationssebene gemessen werden.

Unter der Annahme, daß die Amplitude der elektrischen Feldkomponente  $E$  von der Laser-Lichtquelle 1 gelieferten, linear polarisierten Lichtes gleich  $a$  ist, wird das Laser-Licht mit einer einzigen Frequenz  $\omega$  folgendermaßen ausgedrückt:

$$E_1 = a \sin \omega t$$

Da die Polarisationssebene der Komponente des elektrischen Feldes  $E_1$  unter einem Winkel von  $45^\circ$  in bezug auf die X-Achse angeordnet ist, können die X-Achsen-Komponente  $E_x$  und die Y-Achsen-Komponente  $E_y$  des elektrischen Feldes  $E_1$  folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \omega t \\ E_y &= \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Wenn das Laser-Licht den Faraday-Rotator durchsetzt hat, ist dessen Polarisationssebene um einen Winkel  $F^\circ$  gedreht worden, wie es oben beschrieben ist, und es können deshalb die Komponenten  $E_x$  und  $E_y$  entlang den X- und Y-Achsen des Licht-Ausganges  $E_2$  der von dem Faraday-Rotator ausgegeben wird, folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos F & -\sin F \\ \sin F & \cos F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a}{\sqrt{2}} (\cos F - \sin F) \sin \omega t \\ \frac{a}{\sqrt{2}} (\sin F + \cos F) \sin \omega t \end{pmatrix} \quad (2)$$

Somit ist der Licht-Ausgang  $E_2$  mit den Komponenten  $E_x$  und  $E_y$  auch ein linear polarisiertes Licht mit einem gedrehten Winkel  $\theta = 45^\circ + F$  der Polarisationssebene, der nach der folgenden Gleichung errechnet wird:

$$\tan \theta = \frac{E_y}{E_x} = \frac{\sin F + \cos F}{\cos F - \sin F} = \tan (45^\circ + F) \quad (2A)$$

Ferner kann aus der Gleichung (2) die Amplitude  $|E_2|$  des Licht-Ausganges  $E_2$  berechnet werden, zu:

$$|E_2| = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2} = a$$

Diese Gleichung zeigt, daß die Amplitude des Licht-Ausganges  $E_2$  gleich der Amplitude des Laser-Licht-Einganges ist.

Das Wollaston-Prisma 4 spaltet den Licht-Ausgang  $E_2$  in zwei Komponenten 9 und 10 auf, die X-Achsen und Y-Achsen-Komponenten  $E_x$  und  $E_y$  sind. Die Komponenten 9, d. h. die Komponente  $E_x$ , wird von einer Fotodiode 5 aufgenommen, während die Komponente 10, d. h. die Komponente  $E_y$ , von einer anderen Fotodiode 6 aufgenommen wird. Die Fotodioden 5 und 6 wandeln die Komponenten 9 und 10 in elektrische Signale  $I_1$  und  $I_2$  um, die proportional den Lichtintensitäten  $|E_x|^2$   $|E_y|^2$  der beiden Komponenten 9 bzw. 10 sind. Eine elektronische Schaltung 7 errechnet und

$$(I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$$

$$\text{Since } |E_x| = \frac{a}{\sqrt{2}} (\cos F - \sin F) \text{ und}$$

$$|E_y| = \frac{a}{\sqrt{2}} (\sin F + \cos F),$$

$$\frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} = \frac{|E_+|^2 - |E_-|^2}{|E_+|^2 + |E_-|^2} = \frac{(\sin F + \cos F)^2 - (\cos F - \sin F)^2}{(\sin F + \cos F)^2 + (\cos F - \sin F)^2} = \frac{4 \sin F \cos F}{2} = \sin 2 F \quad (3)$$

In der bekannten Vorrichtung nach Fig. 1 wird der gemessene Wert in Form von  $\sin 2 F$  ausgedrückt, wie es in Gleichung 3 angegeben ist. Dieser Wert ist nicht proportional dem Faraday-Rotationswinkel  $F$ . Infolgedessen ist eine andere Schaltung zur Errechnung der folgenden Beziehung erwünscht:

$$F = \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}$$

Da ferner das gleiche Ergebnis für eine Änderung von  $F$  von  $180^\circ$  erhalten wird, besteht eine andere Schwierigkeit darin, daß der Meßbereich  $F$  auf  $\pm 90^\circ$  beschränkt ist.

Die schwerwiegendste Schwierigkeit der in Fig. 1 gezeigten Vorrichtung liegt darin, daß die Charakteristiken der Fotodioden 5 und 6 zum Driften neigen, wenn die Dioden die Lichtintensitäten  $|E_+|^2$   $|E_-|^2$  in elektrische Signale  $I_+$  und  $I_-$  umwandeln. Genauer gesagt, es fließt in jeder Fotodiode neben dem elektrischen Signal  $I_+$  oder  $I_-$  ein Dunkelstrom. Der Dunkelstrom verändert sich in Abhängigkeit von der Temperaturänderung der Fotodiode und verursacht dadurch eine Drift in den Betriebseigenschaften der Fotodiode. Wenn die nachteilige Wirkung des Dunkelstromes ausgeschaltet werden soll, muß zusätzlich zu der in Fig. 1 gezeigten Schaltung eine komplizierte Schaltung vorgesehen werden.

Außerdem müssen, wenn eine genaue Messung erwünscht ist, die fotoelektrischen Umwandlungsverhältnisse der beiden Dioden 5 und 6 gleich sein. Jedoch ist es unter Berücksichtigung der Änderung der Charakteristiken der Fotodioden über viele Jahre äußerst schwierig, die fotoelektrischen Umwandlungsverhältnisse der beiden Dioden gleichzuhalten.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Phasenvergleichsschaltung für die im Oberbegriff des Patentanspruchs erwähnte Magnetfeld-Meßvorrichtung anzugeben, welche eine der Faraday-Rotation und damit dem zu messenden Magnetfeld direkt proportionale Ausgangsspannung liefert.

Dies wird erfindungsgemäß dadurch erreicht, daß in der Phasenvergleichsschaltung ein erstes Filter und ein zweites Filter vorgesehen sind, welche aus den von den fotoelektrischen Wandlern gelieferten ersten bzw. zweiten elektrischen Signalen Gleichstromkomponenten entfernen, daß Nulldurchgangsdetektoren vorgesehen sind, welche in den von den Filtern kommenden Ausgangssignalen Nulldurchgänge feststellen, daß durch die Ausgangssignale der Nulldurchgangsdetektoren getriggerte Dreistufenzähler vorgesehen sind, daß eine Flip-Flop-Schaltung vorgesehen ist, welche durch die Ausgangssignale von den Dreistufenzählern zurückgestellt und eingestellt sind, und daß ein R-C-Tiefpaßfilter vorgesehen ist, welches das Ausgangssignal der Flip-Flop-Schaltung aufnimmt und eine dem Faraday-Rotationswinkel direkt proportionale Ausgangsspannung liefert.

Hierdurch wird ein dem zu messenden Magnetfeld direkt proportionales Signal erzeugt, das eine Messung des Magnetfeldes mit großer Genauigkeit ermöglicht.

Bei der erfindungsgemäßen Meßvorrichtung ist auch ein optischer Überlagerungsempfänger für eine Demodulation verwendbar.

Die Erfindung ist im folgenden anhand der Zeichnung an Beispielen näher erläutert. In der Zeichnung zeigen: Fig. 1 eine schematische Darstellung der Konstruktion einer bekannten Magnetfeld-Meßvorrichtung unter Verwendung des Faraday-Effektes.

Fig. 2 eine schematische Darstellung eines optischen Systems, das einen wesentlichen Teil der im Oberbegriff des Anspruchs 1 angegebenen Magnetfeld-Meßvorrichtung darstellt,

Fig. 3 ein Blockschaltbild, welches eine Phasenvergleichs-Schaltung gemäß dem kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 zeigt,

Fig. 4 eine graphische Darstellung der Wellenformen und der Zeiten des Auftretens von elektrischen Signalen in der in Fig. 3 gezeigten Phasenvergleichs-Schaltung und

Fig. 5 ein Schaltbild der Konstruktion einer anderen Ausführung einer Magnetfeld-Meßvorrichtung.

Ein einen Teil der erfindungsgemäßen Meßvorrichtung darstellendes optisches System wird zunächst in Verbindung mit Fig. 2 beschrieben. Eine 2-Frequenz-Laser-Lichtquelle 11 sendet in Richtung der Z-Achse ein linear polarisiertes Laser-Licht mit einer X-Achsen-Komponente  $E_x$  aus, das mit einer Lichtfrequenz  $\omega$  schwingt, und sie sendet eine Y-Achsen-Komponente  $E_y$  aus, die mit einer anderen Lichtfrequenz  $\omega + \Delta\omega$  schwingt. Geeignet ist jede bekannte Zweifrequenz-Laser-Lichtquelle, welche den Zeemann-Effekt verwendet. Da die Frequenzdifferenz im Ausgang der Laser-Lichtquelle in der Größenordnung von  $2\pi \times 1,2 \times 10^6$  (rad/s) liegt, kann irgendeine bekannte Fotodiode auf die Frequenzdifferenz ansprechen. An Stelle der oben erwähnten Laser-Lichtquelle, welche den Zeemann-Effekt verwendet, kann eine normale Seiten-Mode-Laser-Vorrichtung für diesen Zweck verwendet werden, die zwei Frequenzkomponenten von  $\omega$  und  $\omega + \Delta\omega$  erzeugt, die in senkrecht aufeinander stehenden Richtungen linear polarisiert sind. Ferner kann als Laser-Lichtquelle 11 eine Vorrichtung verwendet werden, die einen optischen Frequenz-Umformer, wie eine Bragg-Zelle, enthält, der in der Lage ist, eine Frequenz  $\nu + \Delta\nu$  zu erzeugen, die auf einer Frequenz  $\nu$  basiert.

Der Ausgang der Laser-Lichtquelle 11, der zwei Frequenzkomponenten enthält, die in senkrecht aufeinander stehenden Richtungen polarisiert sind, sendet in Richtung der Z-Achse einen Lichtstrahl durch eine Strahlaufspaltvorrichtung 12, die das Laser-Licht in zwei Teile aufspaltet. Ein Teil des Laser-Lichtes mit zwei Komponenten  $E_x$  und  $E_y$ , wie es in Fig. 2 gezeigt ist, durchsetzt dann ein Viertelwellen- $(\lambda/4)$ -Plättchen 15. Der andere Teil des von der Strahl-Aufspaltvorrichtung 12 gelieferten Laser-Lichtes durchsetzt einen optischen Analysator 13.

Wenn angenommen wird, daß die Amplituden der beiden Komponenten  $E_x$  und  $E_y$  des ersten Teiles des von der Strahl-Aufspaltvorrichtung 8 gelieferten Laser-Lichtes beide  $\frac{a}{\sqrt{2}}$  betragen, werden die Komponenten  $E_x$  und

$E_Y$  folgendermaßen ausgedrückt:

$$\left. \begin{aligned} E_X &= \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \omega t \\ E_Y &= \frac{a}{\sqrt{2}} \sin (\omega + \Delta \omega) t \end{aligned} \right\} \quad (4) \quad 5$$

Wenn das linear polarisierte Licht mit den Komponenten  $E_X$  und  $E_Y$ , die durch die Gleichung (4) ausgedrückt sind, das Viertelwellen-Plättchen 15 durchsetzt, deren optische Hauptachse in einer Richtung angeordnet ist, die in bezug auf die X-Achse einen Winkel von  $45^\circ$  bildet, wird die Komponente  $E_X$  in ein rechts kreisförmig polarisiertes Licht  $E_R$  umgewandelt, dessen X-Achsen-Komponenten  $E_{RX}$  und  $E_{RY}$  durch  $E_{RX} = \frac{a}{2} \sin \omega t$  und  $E_{RY} = \frac{a}{2} \cos \omega t$  ausgedrückt werden, während die Komponente  $E_Y$  in ein links kreisförmig polarisiertes Licht  $E_L$  umgewandelt wird, dessen X-Achsen- und Y-Achsen-Komponenten  $E_{LX}$  und  $E_{LY}$  durch  $E_{LX} = \frac{a}{2} \cos (\omega + \Delta \omega) t$  und

$E_{LY} = \frac{a}{2} \sin (\omega + \Delta \omega) t$  umgewandelt wird.

Infolgedessen werden die resultierenden X-Achsen- und Y-Achsen-Komponenten  $E'_X$  und  $E'_Y$  des von dem Viertelwellen-Plättchen 15 gelieferten Laser-Lichtes folgendermaßen ausgedrückt:

$$\left. \begin{aligned} E'_X &= E_{RX} + E_{LX} = \frac{a}{2} [\sin \omega t + \cos (\omega + \Delta \omega) t] \\ E'_Y &= E_{RY} + E_{LY} = \frac{a}{2} [\cos \omega t + \sin (\omega + \Delta \omega) t] \end{aligned} \right\} \quad (5) \quad 25$$

Wenn die Komponenten  $E'_X$  und  $E'_Y$  des von dem Viertelwellen-Plättchen 15 gelieferten Laser-Lichtes einen Faraday-Rotor 16 durchsetzen, wird der Polarisationswinkel des Laserlichtes um einen Winkel von  $F^\circ$  gedreht, wie es vorher beschrieben worden ist, so daß die Ausgangskomponenten  $E''_X$  und  $E''_Y$  des Faraday-Rotators 16 ausgedrückt werden durch

$$\begin{pmatrix} E''_X \\ E''_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos F & -\sin F \\ \sin F & \cos F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E'_X \\ E'_Y \end{pmatrix} \quad (6) \quad 35$$

Aus Gleichung (6) ergibt sich

$$E''_X = E'_X \cos F - E'_Y \sin F \quad (7) \quad 40$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (5) in Gleichung (7) wird erhalten:

$$\begin{aligned} E''_X &= \frac{a}{2} [\cos F (1 - \sin \Delta \omega t) - \sin F \cos \Delta \omega t] \sin \omega t + \frac{a}{2} [\cos F \cos \Delta \omega t - \sin F (1 + \sin \Delta \omega t)] \cos \omega t \\ &= |E''_X| \sin (\omega t + \delta) \end{aligned} \quad 45$$

wobei

$$\tan \delta = \frac{\cos F \cos \Delta \omega t - \sin F (1 + \sin \Delta \omega t)}{\cos F (1 - \sin \Delta \omega t) - \sin F \cos \Delta \omega t} |E''_X| = \frac{a}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \sin (\Delta \omega t + 2F)} \quad (8) \quad 50$$

Ein auf der Ausgangsseite des Faraday-Rotators 16 vorgesehener anderer optischer Analysator 17 ist so ausgebildet, daß er nur die X-Achsen-Komponente  $E''_X$  in Richtung auf die Fotodiode 18 hindurchläßt. Bei Empfang der X-Achsen-Komponente  $E''_X$  liefert die Fotodiode 18 ein elektrisches Signal  $I_X$ , das der optischen Intensität  $|E''_X|^2$  proportional ist, die wiedergegeben wird durch

$$I_X = |E''_X|^2 = \frac{a^2}{2} [1 - \sin (\Delta \omega t + 2F)] \quad (9) \quad 60$$

Wenn die  $\Delta \omega$ -Frequenzkomponente des elektrischen Signals  $I_X$  durch ein Filter extrahiert wird, wie es später noch beschrieben wird, kann ein elektrisches Signal mit einer Frequenz  $\Delta \omega$ , das mit dem zweifachen Faraday-Rotationswinkel  $F$  in der Phase moduliert ist, erhalten werden. Zum Extrahieren einer Frequenzkomponente gleich der Differenz zwischen zwei Lichtfrequenzen  $\omega$  und  $\omega + \Delta \omega$  kann ein optischer Überlagerungsempfänger verwendet werden.

Der andere des von der Strahl-Aufspaltvorrichtung 12 zum optischen Analysator 13 gelieferten Laser-Lichtes wird auch linear polarisiert mit einer X-Achsen- und einer Y-Achsen-Komponente wie  $E_X$  und  $E_Y$ . Der optische

Analysator 13 ist so ausgebildet, daß er ein linear polarisiertes Licht, und zwar in einer Richtung von  $45^\circ$  in bezug auf die  $X$ -Achse polarisiertes Licht, hindurchläßt. Infolgedessen wird der Ausgang des optischen Analysators 13, der mit  $E_{ref}$  bezeichnet ist, durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$E_{ref} = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_x + E_y) = \frac{a}{2} [\sin \omega t + \sin (\omega + \Delta \omega) t] \frac{a}{2} [(1 + \cos \Delta \omega t) \sin \omega t + \sin \Delta \omega t \cos \omega t]$$

$$= |E_{ref}| \sin (\omega t + \delta')$$

wobei

$$\tan \delta' = \frac{\sin \Delta \omega t}{1 + \cos \Delta \omega t}$$

$$|E_{ref}| = \frac{a}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \cos \Delta \omega t} \quad (10)$$

Das Licht  $E_{ref}$  vom optischen Analysator 13 wird einer Fotodiode 14 zugeführt, welche ein elektrisches Signal  $I_{ref}$  liefert, das der optischen Intensität  $|E_{ref}|^2$  proportional ist.

$$I_{ref} = |E_{ref}|^2 = \frac{a^2}{2} (1 + \cos \Delta \omega t) \quad (11)$$

Durch Extraktion der Frequenzkomponente  $\Delta \omega$  aus dem elektrischen Signal  $I_{ref}$  kann ein elektrisches Bezugssignal der Frequenz  $\Delta \omega$  erhalten werden.

Eine elektronische Schaltung, die einen anderen Teil der erfindungsgemäßen Meßvorrichtung darstellt, wird nun im einzelnen in Verbindung mit den Fig. 3 und 4 beschrieben.

In Fig. 3 sind als fotoelektrische Wandler Fotodioden 14 und 18 dargestellt. Die Fotodiode 14 liefert das elektrische Bezugssignal  $I_{ref}$  der Gleichung (11), und es extrahiert ein Filter 19, das mit dem Bezugssignal  $I_{ref}$  gespeist wird, die Frequenzkomponente  $\Delta \omega$ . Der Ausgang  $a$  des Filters 19 ist eine Sinuswelle ohne Gleichstromkomponente, wie es durch eine Kurve ( $a$ ) in Fig. 4 gezeigt ist. Der Ausgang  $a$  durchsetzt einen Nullpunkt-Detektor 21, so daß die Wellenform in gewünschter Weise geändert wird. Jedes Mal dann, wenn der Ausgang des Filters 19 von einem negativen Wert zu einem positiven Wert hinaufgeht und einen Nullpunkt passiert, schaltet der Nullpunkt-Detektor 21 einen 3-Stufen-Zähler 23. Die Weiterschaltung des Zählers 23 ändert aufeinanderfolgend den Zustand des Zählers 23 in der Reihenfolge von 1, 2 und 3, wie es durch die Kurve ( $b$ ) in Fig. 4 gezeigt ist, und wenn der Zustand von 3 auf 1 geändert wird, liefert der Zähler 23 einen Ausgangsimpuls  $C$ , wie es durch die Kurve ( $c$ ) in Fig. 4 gezeigt ist, um die Klemme  $R$  einer Flip-Flop-Schaltung 25 und damit auch diese zurückzustellen.

Andererseits wird eine andere Frequenzkomponente  $\Delta \omega$  aus dem elektrischen Ausgangssignal  $I_x$  extrahiert, das von der Fotodiode 18 geliefert wird, das durch den doppelten Faraday-Rotationswinkel  $F$ , wie er in Gleichung (9) definiert ist, in der Phase moduliert ist. Die Frequenzkomponente von  $\Delta \omega$  hat eine Sinus-Form, wie es in Kurve ( $d$ ) in Fig. 4 gezeigt ist. Jedes Mal wenn ein anderer Nullpunkt-Detektor 22 einen Nullpunkt feststellt, durch den die Sinuswelle, die durch die Kurve ( $d$ ) in Fig. 4 gezeigt ist, von einem negativen Wert zu einem positiven Wert aufsteigt, schaltet ein Nullpunkt-Detektor 22 einen anderen Dreistufen-Zähler 24. Die Weiterschaltung des Zählers 24 ändert aufeinanderfolgend den Zustand des Zählers 24 in der Reihenfolge 1, 2 und 3, wie es durch die Kurve ( $e$ ) in Fig. 4 gezeigt ist, und wenn der Zustand von 3 zu 1 geändert wird, liefert der Zähler 24 Ausgangsimpulse  $f$ , wie sie durch die Kurve ( $f$ ) in Fig. 4 gezeigt sind. Die Ausgangsimpulse  $f$  werden der Einstellklemme  $S$  einer Flip-Flop-Schaltung 25 zugeführt. Das Zeitintervall, in welchem die Flip-Flop-Schaltung 25 rückgestellt wird, beträgt  $3,5 \pi - 2F$  (rad), während das Zeitintervall, in welchem die Flip-Flop-Schaltung 25 eingestellt wird,  $2,5 \pi + 2F$  (rad) beträgt, wie es durch die Kurve ( $g$ ) in Fig. 4 gezeigt ist.

Die Flip-Flop-Schaltung 25 liefert einen Ausgang  $g$ , wie er durch die Kurve ( $g$ ) in Fig. 4 gezeigt ist, der einen Wert von  $+3,5$  V besitzt, wenn die Flip-Flop-Schaltung 25 eingestellt ist, und einen Wert von  $-2,5$  V besitzt, wenn die Flip-Flop-Schaltung 25 rückgestellt ist. Ein RC-Tiefpaß 26 nimmt den Ausgang  $g$  der Flip-Flop-Schaltung 25 auf, und liefert eine mittlere Gleichspannung  $v$ , wie sie durch die folgende Gleichung wiedergegeben wird:

$$v = \frac{3,5 (2,5 \pi + 2F) - 2,5 (3,5 \pi - 2F)}{6 \pi} = \frac{2F}{\pi} \text{ (V)} \quad (12)$$

die exakt proportional dem Faraday-Rotationswinkel  $F$  ist. Wie sich aus Gleichung (12) ergibt, besitzt die erfindungsgemäße Meßvorrichtung ein weiteres vorteilhaftes Merkmal insofern, als die gemessenen Ergebnisse nicht durch die Änderung der Überlagerungs-Frequenz-Differenz  $\Delta \omega$  beeinflusst werden. Da ferner die Gleichstromkomponenten der elektrischen Signale  $I_{ref}$  und  $I_x$  durch die Tiefpaßfilter 19 und 20 ausgeschaltet werden, sind die gemessenen Ergebnisse nicht durch die Drift in den Betriebseigenschaften der Fotodioden 14 und 18 beeinträchtigt. Die Nullpunkt Detektoren 21 und 22 stellen Nullpunkte fest, und zwar unabhängig von den Amplituden der  $\Delta \omega$ -Frequenzkomponenten  $a$  und  $d$  der elektrischen Signale  $E_{ref}$  und  $I_x$ , und es wird deshalb die Präzision der Messung weder durch die Intensität des von der Laser-Quelle 11 gelieferten Laser-Lichtes noch durch die Änderung in den Charakteristiken der Fotodioden 14 und 18, die durch Alterung hervorgerufen wird, beeinträchtigt.

Die Ausführung der Erfindung mit einer elektrischen Schaltung, wie sie in Fig. 3 gezeigt ist, besitzt einen Meßbereich von  $\pm 1,5 \pi$  (rad) für den Faraday-Rotationswinkel  $F$ . Jedoch kann der Meßbereich gegebenenfalls vergrößert werden, in dem die Anzahl von Stufen in den Zählern 23 und 24 erhöht wird.

Eine andere Ausführung der Erfindung, bei welcher ein Strom  $I$ , der durch einen Höchstspannungsleiter 27 fließt, gemessen wird, ist in Fig. 5 dargestellt. In dieser Ausführung sind mehrere Windungen einer optischen Monomode-Faser 30 um den Leiter 27 gewunden, so daß der durch den Leiter 27 fließende Strom  $I$  aus dem Rotationswinkel der Polarisationssebene eines Laser-Lichtes bestimmt wird, welches die optische Faser 30 durchsetzt. Im einzelnen erzeugt in dieser Ausführung eine Zweifrequenz-Laser-Lichtquelle 11 ein Laser-Licht mit einer Komponente, die mit einer Lichtfrequenz  $\omega$  schwingt, und eine andere Komponente, die mit einer Lichtfrequenz  $\omega + \Delta\omega$  schwingt, wobei beide Komponenten rechtwinklig zueinander verlaufen. Das von der Quelle 11 gelieferte Laser-Licht wird dann durch eine die Polarisationssebene beibehaltende optische Faser 28 zu einer Strahl-Aufspaltvorrichtung 12 übertragen. In der Strahl-Aufspaltvorrichtung 12 wird das Laser-Licht in zwei Teile aufgespalten, von denen ein Teil durch ein Viertelwellen-Plättchen 15 in die optische Monomode-Faser 30 mit der Faraday-Wirkung übertragen wird, während der andere Teil in einen optischen Analysator 13 geliefert wird. Der Ausgang der optischen Faser 30, dessen Polarisationssebene unter der Wirkung des Faraday-Effektes gedreht worden ist, tritt dann in einen anderen optischen Analysator 17 ein, welcher nur eine vorbestimmte Polarisationskomponente  $E_x$  der Gleichung (8) extrahiert. Die Komponente  $E_x$  wird dann durch eine andere optische Faser 31 einer Fotodiode 18 zugeleitet, welche die Komponente  $E_x$  in ein elektrisches Signal  $I_1$  der Gleichung (9) umwandelt, das mit der Differenzfrequenz  $\Delta\omega$  schwingt. Die optische Faser 31 kann das in der optischen Intensität modulierte Signal (9) korrekt übertragen, und zwar unabhängig von seiner Länge, in einem Falle, in welchem der Frequenzbereich höher  $\Delta\omega$  ist. Da ferner die Messung nach der vorliegenden Erfindung auf einem Prinzip beruht, das nicht durch den optischen Verlust in der Faser 31 beeinträchtigt wird, können die in der Faser modulierten Daten  $2F$  der Gleichung (9) über eine große Entfernung durch die Faser 31 übertragen werden.

Ein anderer Teil des von der Strahl-Aufspaltvorrichtung 12 gelieferten Laser-Lichtes wird von dem optischen Analysator aufgenommen, welcher nur eine Komponente  $E_y$  aufnimmt, deren Amplitude durch die Gleichung (10) angezeigt ist. Der Ausgang des optischen Analysators 13 wird durch eine weitere optische Faser 29 zu einer anderen Fotodiode 14 geliefert, welche den Ausgang in ein elektrisches Signal  $I_y$  der Gleichung (11) umwandelt. Die optische Faser 29 kann die Bezugsphasen-Daten korrekt übertragen, und zwar unabhängig von der Länge der optischen Fasern 29, wenn der Frequenzbereich höher als  $\Delta\omega$ . Infolgedessen kann ein gemessener Wert des Stromes  $I$ , der durch den Höchstspannungs-Leiter 27 fließt, genau zu einer Station 32 übertragen werden, die von dem Leiter 27 entfernt angeordnet ist, und zwar unabhängig von den Fällen, in denen ein Rauschen durch einen Blitz intensiv ist.

Bei Übertragung einer Faraday-Rotation in einer optischen Monomode-Faser 30 über eine große Entfernung zur Station 32 sind bisher die Rotationsdaten  $F$  gestört worden, während das Licht übertragen wurde, und es konnten keine korrekten Daten in der Station 32 erhalten werden. Nach der Erfindung können die Faraday-Rotationsdaten mit hoher Präzision übertragen werden, und zwar unabhängig von dem optischen Verlust und von der Veränderung in dem Polarisationszustand, der durch die lange Übertragungsleitung hervorgerufen wird, so daß der Strom  $I$ , der durch den Höchstspannungsleiter fließt, genau gemessen werden kann.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen